



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

EVALUACIÓN DE UN ADITIVO ECOLÓGICO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO: UNA ALTERNATIVA SOSTENIBLE PARA EL BACHEO.

Jorge Vázquez Camacho¹, Israel Sandoval Navarro¹,
Luis Ángel Plascencia Correa¹ y Ignacio Cremades Ibáñez²

¹ Lasfalto S. de R.L. de C.V. Zapopan, México, jorga.vazquez@lasfalto.com.mx

¹ Lasfalto S. de R.L. de C.V. Zapopan, México, israel.@lasfalto.com.mx

¹ Lasfalto S. de R.L. de C.V. Zapopan, México, luis.plascencia@lasfalto.com.mx

² Surfax, Zapopan, México. ignacio.cremades@surfax.com.mx

Resumen

En este estudio experimental, se exploró la viabilidad de implementar un nuevo aditivo para asfalto en la fabricación de mezclas asfálticas en frío destinadas al bacheo. Se identificó una problemática ambiental y de seguridad asociada al uso del diésel, comúnmente usado como solvente para rebajar el asfalto en la producción de estas mezclas asfálticas. El diésel emite altas cantidades de compuestos orgánicos volátiles (VOC) y representa riesgos para el personal y el proceso de fabricación. La introducción del aditivo ecológico ofreció una solución innovadora y sostenible para abordar estos problemas. A través de análisis térmicos, se evidenció una reducción significativa en las emisiones de VOC, contribuyendo así a un ambiente más saludable. Además, se demostró que el aditivo ecológico simplifica y optimiza el proceso de producción, minimizando los riesgos de ignición y mejorando la seguridad en el lugar de trabajo. Se evaluaron otras propiedades como temperaturas de degradación y punto de inflamación asociadas a la naturaleza del aditivo ecológico, con la finalidad de demostrar los rangos de temperatura a los cuales el aditivo puede trabajar sin comprometer la calidad de las mezclas asfálticas y evitar riesgos potenciales. La investigación incluyó el diseño de mezclas para bacheo con el aditivo ecológico, adaptadas a diversas especificaciones granulométricas. Estas mezclas fueron evaluadas bajo pruebas de laboratorio, utilizando ensayos como estabilidad Marshall, flujo. Además, se investigó la capacidad de almacenamiento de las mezclas con el aditivo, analizando su capacidad para mantener sus propiedades incluso después de un periodo prolongado, asegurando su efectividad al aplicarlas en el campo sin comprometer su calidad. Los resultados demostraron que las mezclas con el aditivo mantienen buena estabilidad y durabilidad a lo largo del tiempo, cumpliendo con estándares de calidad para mezclas asfálticas en frío.

Palabras Clave: Sostenibilidad, ecológico, bacheo, durabilidad.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

1. Introducción

El proceso de producción de mezclas asfálticas en planta admite un amplio rango de posibilidades de selección de materias primas, tecnologías y equipos utilizados, cada una de las cuales puede influir de diferente manera sobre el medio ambiente. Este estudio se centra en la implementación de un aditivo ecológico en la fabricación de mezclas asfálticas en frío. A través de una serie de pruebas de laboratorio, se evaluó la eficacia del aditivo en las propiedades de las mezclas asfálticas. Las pruebas incluyeron análisis térmicos para medir las emisiones de VOC, y ensayos de estabilidad y durabilidad de las mezclas. Los resultados de estas pruebas proporcionan una visión integral de los beneficios potenciales del aditivo ecológico y su viabilidad como una alternativa sostenible en la industria de la pavimentación.

El uso de mezclas asfálticas en frío es una práctica extendida en el mantenimiento y reparación de infraestructuras viales, particularmente en el bacheo de carreteras. Estas mezclas son apreciadas por su facilidad de aplicación y almacenamiento, permitiendo que las reparaciones se realicen de manera rápida y eficiente. Sin embargo, los solventes comúnmente utilizados en la fabricación de estas mezclas, como el diésel, plantean serios problemas ambientales y de seguridad que no pueden ser ignorados.

Los solventes como el diésel son conocidos por emitir altos niveles de compuestos orgánicos volátiles (VOC) durante su uso [1]. Estos VOC no solo contribuyen a la contaminación atmosférica, sino que también tienen efectos adversos significativos sobre la salud humana. La exposición prolongada a VOC puede causar problemas respiratorios, dolores de cabeza, irritación de los ojos y la piel, y en casos extremos, problemas más graves como enfermedades respiratorias crónicas y cáncer. Además, los solventes convencionales incrementan el riesgo de incendios durante el proceso de producción y almacenamiento, presentando un peligro constante para los trabajadores y las instalaciones.

Ante estos desafíos, surge la necesidad de buscar alternativas más sostenibles y seguras para la producción de mezclas asfálticas en frío. En este contexto, los aditivos ecológicos se presentan como una solución innovadora. Estos aditivos, desarrollados a partir de materiales renovables y menos tóxicos, tienen el potencial de reducir significativamente las emisiones de VOC y mejorar la seguridad en el lugar de trabajo. Además, se espera que los aditivos ecológicos mantengan o incluso mejoren las propiedades funcionales de las mezclas asfálticas, asegurando su durabilidad y rendimiento en aplicaciones de bacheo.

2. Marco Teórico

2.1. Mezclas Asfálticas para bacheo en frío.

Las mezclas asfálticas para bacheo en frío son compuestos que pueden almacenarse y aplicarse sin necesidad de calentamiento, lo que las hace ideales para reparaciones rápidas de carreteras. Se componen de agregados pétreos y un ligante asfáltico, aditivado con solventes para mantener su manejabilidad a bajas temperaturas. Estas mezclas son especialmente útiles en situaciones donde el uso de mezclas en caliente no es práctico debido a condiciones climáticas adversas o limitaciones logísticas.

2.2. Métodos Convencionales de Bacheo

2.2.1. Bacheo en caliente



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

Utiliza mezclas asfálticas en caliente, que se aplican a temperaturas elevadas. Este método ofrece una solución duradera, pero presenta ciertas limitaciones prácticas. Requiere equipos especializados y no es adecuado en condiciones climáticas adversas, ya que el enfriamiento de las mezclas con el tiempo reduce su manejabilidad. Esto puede dificultar la aplicación y la compactación, ya que las mezclas tienden a endurecerse, complicando su uso eficaz en el terreno.

2.2.2. Bacheo en frío

El bacheo en frío utiliza mezclas asfálticas que pueden almacenarse y aplicarse sin necesidad de calentamiento, lo cual es ideal para reparaciones rápidas. Sin embargo, estas mezclas suelen incluir solventes que generan altas cantidades de compuestos volátiles orgánicos (VOC), lo que presenta varios riesgos significativos. Los VOC pueden ser peligrosos tanto para el medio ambiente como para la salud humana. Además, el uso de estos solventes pone en riesgo la seguridad de los equipos y la maquinaria, así como del personal encargado de la aplicación, debido a su alta inflamabilidad y la posibilidad de causar explosiones o incendios si no se manejan adecuadamente.

2.3. Termogravimetría (TGA)

La termogravimetría (TGA) es una técnica de análisis térmico que mide el cambio de masa de una muestra mientras se calienta a una velocidad controlada, proporcionando información sobre la composición, estabilidad térmica y propiedades materiales.

Uno de los usos importantes de la TGA es la medición de compuestos orgánicos volátiles (VOC) en solventes y otros materiales. Los VOC son compuestos que se evaporan fácilmente a temperatura ambiente y pueden tener impactos significativos en la salud humana y el medio ambiente [2].

Identificación de VOC: Durante el análisis TGA, los VOC presentes en una muestra se volatilizan y se pierden a medida que la temperatura aumenta. Al monitorear la pérdida de masa en función de la temperatura, es posible identificar los puntos en los que estos compuestos se evaporan, proporcionando información sobre su naturaleza y volatilidad.

Cuantificación de VOC: La TGA permite cuantificar la cantidad total de VOC presentes en una muestra. Al comparar la masa inicial y final de la muestra, se puede determinar el porcentaje de masa que corresponde a los VOC, lo que es crucial para evaluar la concentración de estos compuestos.

Temperaturas de Evaporación: La TGA también permite determinar las temperaturas específicas a las que los VOC comienzan a evaporarse. Esta información es vital para diseñar procesos de fabricación y almacenamiento que minimicen la emisión de VOC y cumplan con las regulaciones ambientales.

Ventajas de la TGA

- **Precisión y Sensibilidad:** La TGA ofrece una alta precisión y sensibilidad en la medición de cambios de masa, lo que la hace ideal para estudios detallados de composición y estabilidad.
- **Amplio Rango de Temperatura:** La TGA puede operar en un amplio rango de temperaturas, lo que permite el análisis de una variedad de materiales.
- **Versatilidad:** La técnica es aplicable a sólidos, líquidos y gases, proporcionando una herramienta versátil para la investigación y el control de calidad.

2.4. Problemas Asociados al Uso de Solventes Convencionales

El uso de diésel como solvente en las mezclas asfálticas en frío genera altos niveles de compuestos orgánicos volátiles (VOC), contribuyendo a la contaminación atmosférica y presentando riesgos de salud para los trabajadores. Los VOC son compuestos orgánicos que se volatilizan fácilmente a



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

temperatura ambiente y pueden tener efectos adversos significativos sobre la salud humana y el medio ambiente.

2.5. Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC)

2.5.1 Definición general y clasificaciones

Compuestos orgánicos volátiles (VOC) significa cualquier compuesto de carbono, excluyendo monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido carbónico, carburos o carbonatos metálicos y carbonato de amonio, que participa en reacciones fotoquímicas atmosféricas, excepto aquellos designados por la Agencia de protección ambiental de los estados unidos (EPA) como de reactividad fotoquímica insignificante [1].

Los compuestos químicos orgánicos están presentes en todas partes, tanto en ambientes interiores como exteriores, porque se han convertido en ingredientes esenciales en muchos productos y materiales. En exteriores, los VOC se volatilizan o liberan al aire principalmente durante la fabricación o el uso de productos y materiales de uso diario. En interiores, la mayoría de los VOC se liberan al aire debido al uso de productos y materiales que contienen VOC.

Los VOC son motivo de preocupación tanto como contaminantes del aire en interiores como en exteriores. Sin embargo, el énfasis de esa preocupación en exteriores es diferente que en interiores. La principal preocupación en interiores es el potencial de los VOC de afectar negativamente la salud de las personas expuestas. Si bien los VOC también pueden ser un problema de salud en exteriores, la EPA regula los VOC en exteriores principalmente debido a su capacidad de crear smog fotoquímico en determinadas condiciones.

Aunque se utiliza el mismo término “VOC” para la calidad del aire interior y exterior, el término se define de forma diferente para reflejar su preocupación predominante en cada contexto. Esto ha creado un malentendido en el mercado y en la comunidad ambiental. Además, la cantidad y la composición medidas de VOC en el aire pueden variar significativamente según los métodos de medición utilizados, lo que ha generado una confusión adicional.

Los compuestos orgánicos volátiles, o VOC, son compuestos químicos orgánicos cuya composición les permite evaporarse en condiciones atmosféricas interiores normales de temperatura y presión. Esta es la definición general de VOC que se utiliza en la literatura científica y es coherente con la definición utilizada para la calidad del aire interior. Dado que la volatilidad de un compuesto es generalmente mayor cuanto menor es su temperatura de ebullición, la volatilidad de los compuestos orgánicos a veces se define y clasifica por sus puntos de ebullición [1].

Por ejemplo, la Unión Europea utiliza el punto de ebullición, en lugar de su volatilidad, en su definición de VOC.

2.6. Bacheo con aditivos ecológicos

Utiliza mezclas asfálticas en frío modificadas con aditivos ecológicos, lo que reduce las emisiones de VOC y mejora la seguridad del personal y en el lugar de trabajo.

2.7. Aditivos Ecológicos para mezclas asfálticas para bacheo en frío.

Los **Aditivos Ecológicos** para mezclas asfálticas son compuestos innovadores y sostenibles que pueden ayudar en el proceso de fabricación de las mezclas asfálticas sin comprometer su rendimiento. Formulados a partir de materiales naturales y/o reciclados, estos aditivos reducen significativamente el



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

impacto ambiental y mejoran las condiciones de trabajo al disminuir las emisiones de VOC. Reemplazan los solventes convencionales, como el diésel, con alternativas más seguras y menos contaminantes.

3. Materiales utilizados.

En este apartado se proporciona información sobre los materiales utilizados que se siguió para el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

3.1. Cemento Asfáltico

El asfalto base utilizado es un PG 64-22, proveniente de la refinería de Salamanca, Guanajuato, México. Los asfaltos utilizados en este estudio son:

Asfalto convencional base, PG 64-22.

Asfalto convencional con *Diesel como solvente*.

Asfalto convencional con *Aditivo Ecológico*.

3.2. Agregados

Se empleó un agregado pétreo triturado de origen basáltico.

3.3. Aditivos

Se utilizó *Diesel* como solvente y un *Aditivo Ecológico* formulado con productos reciclados. Este aditivo ecológico, posee propiedades físicas y químicas que permiten fabricar mezclas asfálticas, reduciendo su impacto ambiental. Una de sus principales ventajas es la significativa disminución de la viscosidad del cemento asfáltico, lo que facilita su aplicación y manejo. Además, este aditivo destaca por su baja emisión de (VOC), a temperatura ambiente y en temperaturas de proceso de producción de mezclas asfálticas, lo que contribuye a una menor contaminación del aire y a un entorno de trabajo más seguro para el personal. Su uso no solo promueve prácticas de construcción más sostenibles, sino que también minimiza los riesgos asociados con la exposición a sustancias tóxicas y mejora la eficiencia de los procesos de fabricación de mezclas para bacheo en frío.

4. Metodología

4.1. Diseño Experimental

El estudio se centró en la incorporación de un *Aditivo Ecológico* en la fabricación de mezclas asfálticas para bacheo en frío, con el objetivo de evaluar los beneficios ambientales, es decir, cuantificar la reducción de emisiones de VOC al utilizar aditivos ecológicos en lugar de diésel como fluxante. Al mismo tiempo comparar las propiedades de las mezclas convencionales con el uso del diésel como solvente y las mezclas con un Aditivo Ecológico. *Se utilizaron diferentes contenidos de asfalto en las mezclas para determinar las condiciones óptimas en sus propiedades. Sin embargo, en el artículo solo se reporta el contenido óptimo de asfalto obtenido de las pruebas.*

4.2. La parte experimental se estructura en cinco etapas principales

1. Caracterización de los aditivos puros, aditivos en el ligante asfáltico y en las mezclas asfálticas mediante Termogravimetría [3].



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

2. Curva granulométrica de los agregados pétreos.
3. Diseño volumétrico de las mezclas asfálticas.
4. Evaluación del desempeño de las mezclas.
5. Caracterización de los ligantes asfálticos con ambos productos.

4.3. Pruebas de Laboratorio

Para evaluar y comparar las propiedades del Diésel y el aditivo Ecológico, se realizaron las siguientes pruebas de laboratorio.

4.3.1. Termo Análisis

Se utilizó un analizador termogravimétrico (TGA 4000) para medir la pérdida de masa de las muestras al calentarse, cuantificando las emisiones de volátiles. Los resultados compararon las emisiones de aditivos puros, así como de ligantes asfálticos con diésel y con un aditivo ecológico. Se observó una reducción significativa en las emisiones al usar el aditivo ecológico. También se evaluó la pérdida de masa de mezclas asfálticas fabricadas con ligante asfáltico y diésel, y con ligante asfáltico y aditivo ecológico.

5. Resultados

5.1. Medición de pérdida de masa por TGA del solvente puro vs pérdidas volátiles del Aditivo Ecológico puro

El análisis termogravimétrico (TGA) mostró una notable reducción en las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC) al sustituir el diésel por un Aditivo Ecológico. Los resultados, resumidos en la Tabla 1, evidencian una disminución significativa de las emisiones del Aditivo Ecológico en diversas condiciones. Las pruebas TGA se realizaron bajo diferentes temperaturas y tiempos, evaluando las pérdidas volátiles del Diésel y del aditivo ecológico, puros, así como de los ligantes asfálticos y mezclas asfálticas fabricadas con estos aditivos [3].

Tabla 1. Pérdidas volátiles del solvente puro vs pérdidas volátiles del Aditivo Ecológico

Temperatura °C	Tiempo (min.)	% pérdidas volátiles Aditivo Ecológico	% pérdida volátiles Diésel
50	30	1,221	5,730
60	30	0,605	5,584
70	30	0,720	6,477
80	30	0,896	7,668
90	30	1,081	8,679
100	30	1,195	9,204
110	30	1,556	9,276
120	30	1,590	9,505
130	30	1,108	-
Total	30	10,1%	62,1%



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

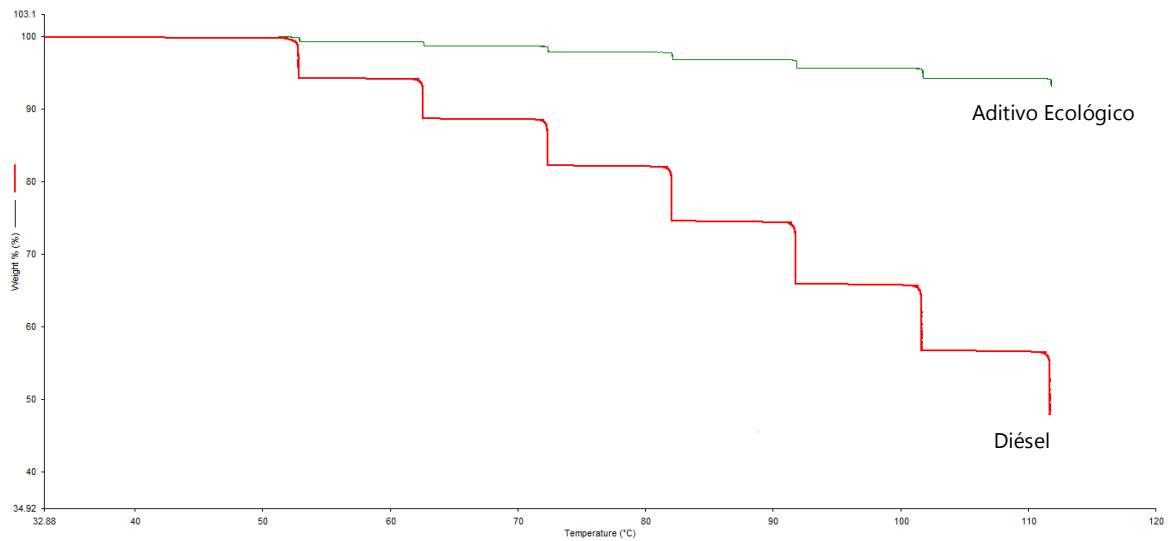


Figura 1: Comparación de Emisiones de VOC entre Solventes Convencionales (Diésel) y Aditivos Ecológicos

5.1.2. Medición de pérdida de masa por TGA de ligantes asfálticos con Diésel vs pérdidas volátiles de ligantes asfálticos con Aditivo Ecológico.

Se compararon las pérdidas volátiles de ligantes asfálticos utilizando un aditivo ecológico versus diésel bajo diferentes condiciones de temperatura y tiempo. A 110°C durante 60, 90 y 120 minutos, y a 150°C durante 300 minutos, el ligante asfáltico con aditivo ecológico mostró consistentemente menores pérdidas volátiles en comparación con el ligante asfáltico con diésel. Estas pruebas incluyeron la temperatura de 150°C, típicamente utilizada en la mayoría de las plantas de fabricación de mezclas para bacheo, destacando la eficacia del aditivo ecológico para reducir las emisiones de volátiles en condiciones representativas de la industria [3], [4].

Tabla 2: Pérdidas volátiles de los ligantes asfálticos con ambos aditivos.

Temperatura °C	Tiempo	% pérdidas volátiles Asfalto con Aditivo Ecológico	% pérdida volátiles Asfalto con Diésel
110 ± 1	60 min.	1,806	4,236
110 ± 1	90 min.	1.877	5.378
110 ± 1	120 min.	1.952	5.907
150 ± 1	300 min.	3.66	14,22

5.1.3. Medición de pérdida de masa por TGA de mezclas asfálticas con ligantes asfálticos -Diésel vs pérdidas volátiles de mezclas asfálticas con ligantes asfálticos -Aditivo Ecológico.

Se compararon las pérdidas de volátiles de mezclas asfálticas utilizando ligantes asfálticos con el Aditivo Ecológico versus Diésel bajo condiciones controladas de temperatura y tiempo. A 110°C durante 60 minutos, la mezcla asfáltica con Aditivo Ecológico mostró una notable reducción en las pérdidas volátiles en comparación con la mezcla asfáltica con diésel. Estos resultados destacan la eficacia del aditivo ecológico para minimizar las emisiones de volátiles durante el proceso de fabricación de mezclas asfálticas, indicando su potencial para mejorar la sostenibilidad ambiental y la seguridad en aplicaciones de pavimentación [5], [6].



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Tabla 3: Pérdidas volátiles de las mezclas asfálticas con ambos aditivos.

Temperatura la prueba (°C)	Tiempo (min)	% pérdidas volátiles de la mezcla asfáltica con Aditivo	
		Ecológico	Diésel
110 ± 1	60	0,04	0,12
110 ± 1	60	0,035	0,124
110 ± 1	60	0,041	0,119

5.2. Normas y métodos para medición de los VOC.

En el estudio propuesto para medir los compuestos orgánicos volátiles (VOC), se encuentran la ASTM D3960-05 (2018), que establece los procedimientos para la medición de VOC en productos ambientales y ASTM E 1868-10 para la medición de pérdida por secado mediante termogravimetría (TGA). Además, se considera el método descrito en "Estimation of volatile emission potential of pesticides by thermogravimetry", que proporciona pautas adicionales para la evaluación de emisiones volátiles.

5.3. Caracterización básica de los cementos asfáltico

Penetración a 25°C (ASTM D 5M-19), Punto de inflamación Cleveland, (°C) (ASTM D8254-19) y Viscosidad Rotacional Brookfield (ASTM D 4402-15 2022) a diferentes temperaturas °C. En el presente estudio se analizaron las propiedades de mezclas asfálticas utilizando dos tipos de aditivos: un aditivo ecológico y diésel. Los parámetros evaluados incluyeron la penetración a 25°C, el punto de inflamación y la viscosidad a diferentes temperaturas (60°C, 80°C, 100°C y 120°C). A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las mezclas [7], [8].

Tabla 4. Caracterización de los ligantes asfálticos

Producto	Penetración 25°C mm	Punto de inflamación °C	Viscosidad 60°C Cp	Viscosidad 80°C Cp	Viscosidad 100°C Cp	Viscosidad 120°C Cp
Asfalto-Aditivo Ecológico	>220	220	1745	1090	600	180
Asfalto-Diésel	>220	135	1680	1030	550	140

5.4. Para los agregados pétreos

Se llevó a cabo un análisis de las características de calidad y granulometría del agregado pétreo a fin de establecer una curva granulométrica que se encuentre dentro de los límites granulométricos (figura 2) para una mezcla asfáltica densa de tamaño nominal 3/8" establecidos en la normativa de la Secretaría de Comunicaciones Infraestructura y Transporte N.CMT.4.04/17.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Malla	Diseño 50-50	Límite inferior	Límite superior
¾"	100	-	-
½"	100	90	100
⅜"	95	76	92
¼"	57	56	81
No. 4	45	45	74
No. 10	22	25	55
No. 20	14	15	42
No. 40	10	11	32
No. 60	8	8	25
No. 100	6	5	18
No. 200	5	2	9

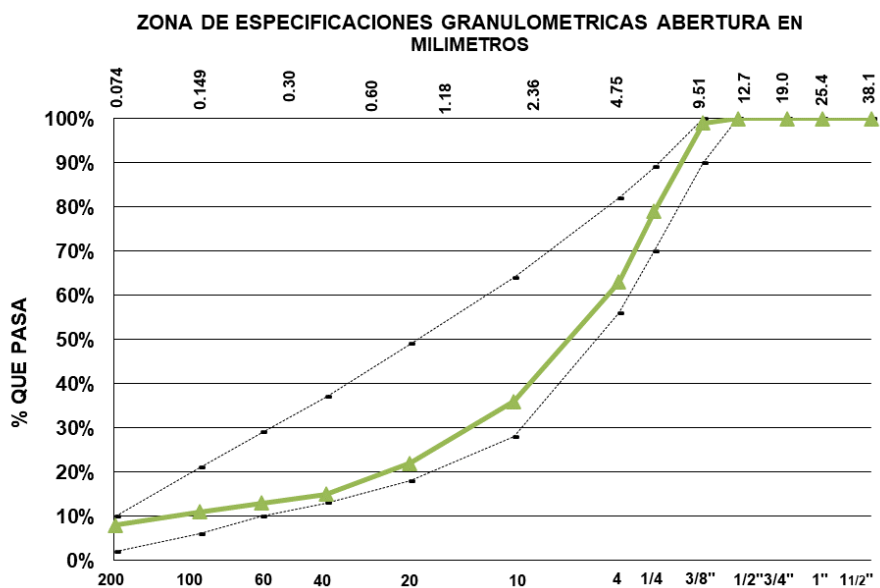


Figura 2. Curvas granulométricas de las combinaciones sello – arena

5.5. Diseño volumétrico

5.5.1. Formulaciones de las Mezclas

Se utilizó un ligante asfáltico conformado por 70% ligante y 30% ADITIVO ECOLOGICO, el cual, es un aditivo especializado para fabricar mezclas para bacheo perdurables.

Se utilizó un ligante asfáltico conformado por 80% ligante y 20% SOLVENTE DIÉSEL, el cual, es el solvente convencionalmente usado para fabricar mezclas para bacheo.

5.5.2. Procedimiento de mezclado y compactación de las Mezclas

Las temperaturas de mezclado fueron 120°C y las temperaturas de compactación fueron 100°C. Para el diseño volumétrico se fabricaron especímenes con diferentes contenidos de asfalto, la compactación se llevó a cabo mediante el método Marshall compactando especímenes de 4 pulgadas de diámetro con 75 golpes por cara.

5.5.3. Estabilidad y flujo Marshall



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

Para evaluar las mezclas, se sometieron a ensayos de flujo y estabilidad Marshall en dos periodos, una probeta de cada tipo de asfalto se ensayó un día posterior a su fabricación y otra se evaluó un mes después, los especímenes se acondicionaron a una temperatura de 25°C previo a la ejecución de la prueba.

5.6. Propiedades volumétricas

En la Tabla 5., se muestran los resultados de las propiedades volumétricas de las mezclas fabricadas con un 6,0% de ligante asfáltico con relación a la masa de los agregados, 5.66% con relación a la masa de la mezcla; se fabricaron 4 especímenes con cada uno de los asfaltos. La mezcla se fabricó con la granulometría compuesta por 50% de sello y 50% de arena.

Se realizaron pruebas de propiedades volumétricas y estabilidad y flujo Marshall en mezclas asfálticas utilizando ligantes asfálticos con aditivo ecológico y diésel. Los resultados muestran que las mezclas con aditivo ecológico mantienen una densidad compacta ligeramente menor, pero con porcentajes de vacíos menores en comparación con las mezclas con diésel. Además, las mezclas con aditivo ecológico exhibieron valores consistentes de estabilidad y flujo Marshall, indicando su potencial para ser una alternativa viable y sostenible en la pavimentación, destacando por sus propiedades mejoradas y potencial reducción en impacto ambiental.

Tabla 5. Propiedades volumétricas y estabilidad y flujo Marshall de las mezclas asfálticas con ligante asfáltico conformado por ligante y aditivo ecológico.

ID probetas Ligante-Aditivo Ecológico	% C.A.M	% C.A.P.	Densidad Máxima Teórica (T/m3) (G_{mm})	Densidad Compacta (T/m3) (G_{mb})	% de vacíos (V_a)	Estabilidad	Flujo
1	5,66	6,00	2,474	2,287	8,6	832	3.6
2	5,66	6,00	2,474	2,248	8,2	734	3.6
3	5,66	6,00	2,474	2,249	8,1	847	3.6
4	5,66	6,00	2,474	2,238	8,5	734	4.2
5	5,66	6,00	2,474	2,272	8,2	743	4.1
6	5,66	6,00	2,474	2,242	8,4	707	3.9
7	5,66	6,00	2,474	2,260	7,7	734	4.2
8	5,66	6,00	2,474	2,231	7,8	743	3.7
9	5,66	6,00	2,474	2,278	7,9	728	3.7
10	5,66	6,00	2,474	2,264	8,5	748	4.0
11	5,66	6,00	2,474	2,246	8,2	770	4.3
12	5,66	6,00	2,474	2,265	8,5	788	4.1

Tabla 6. Propiedades volumétricas y estabilidad y flujo Marshall de las mezclas asfálticas con ligante asfáltico conformado por ligante y solvente diésel.

ID probetas Ligante-Diésel	% C.A.M	% C.A.P.	Densidad Máxima Teórica (T/m3) (G_{mm})	Densidad Compacta (T/m3) (G_{mb})	% de vacíos (V_a)	Estabilidad	Flujo
1	5,66	6,00	2,474	2.267	8.3	729	3.2
2	5,66	6,00	2,474	2.282	7.7	846	3.0
3	5,66	6,00	2,474	2.280	7.8	812	3.0



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

4	5,66	6,00	2,474	2.231	6.9	949	3.1
5	5,66	6,00	2,474	2.280	7.1	744	3.1
6	5,66	6,00	2,474	2.282	7.0	798	3.0

Además de los ensayos mencionados anteriormente, en el estudio se evaluó la manejabilidad de las mezclas asfálticas para bacheo en frío fabricadas con el aditivo ecológico. El objetivo principal fue determinar si estas mezclas mantenían una alta calidad y funcionalidad en condiciones reales de uso.

La manejabilidad de las mezclas asfálticas es crucial para su aplicación eficiente en el bacheo de carreteras, ya que una mezcla manejable permite una fácil colocación y compactación, incluso en condiciones climáticas adversas. En este estudio, se realizaron pruebas de manejabilidad inmediatamente después de la fabricación de las mezclas y tras varios períodos de almacenamiento para simular condiciones de vida de anaquel.

Los resultados obtenidos fueron muy favorables. Las mezclas asfálticas fabricadas con el aditivo ecológico demostraron una excelente manejabilidad, tanto en el momento de la fabricación como después de períodos prolongados de almacenamiento. Esto significa que las mezclas se mantuvieron fáciles de aplicar y compactar, evitando problemas comunes como la rigidez y la falta de trabajabilidad que pueden ocurrir con el tiempo.

En cuanto a la vida de anaquel, las mezclas asfálticas con el aditivo ecológico mostraron una notable estabilidad durante el almacenamiento. Las pruebas indicaron que, incluso después de meses de almacenamiento, las mezclas mantenían su calidad inicial sin deterioro significativo en sus propiedades. Esta alta vida de anaquel es un beneficio considerable para las operaciones de mantenimiento vial, ya que permite almacenar las mezclas durante largos períodos sin pérdida de eficacia, facilitando la planificación y ejecución de reparaciones de bacheo.

6. Conclusiones.

Basado en los resultados obtenidos se demuestra consistentemente que el uso del Aditivo Ecológico en ligantes y mezclas asfálticas demuestra consistentemente una reducción significativa en las pérdidas volátiles comparado con el diésel, tanto a bajas como altas temperaturas y en condiciones de uso puro. A diversas temperaturas y tiempos de prueba, las muestras con Aditivo Ecológico exhibieron pérdidas volátiles considerablemente menores, lo cual indica su capacidad para mejorar la sostenibilidad ambiental al reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC).

Estos hallazgos subrayan la importancia de adoptar aditivos ecológicos en la industria de la construcción de carreteras como una medida efectiva para mitigar impactos ambientales y promover prácticas más responsables y seguras. Basado en los resultados obtenidos de las pruebas de propiedades volumétricas y estabilidad y flujo Marshall en mezclas asfálticas, se observa que el uso del aditivo ecológico en lugar del diésel como solvente produce mezclas con características favorables. Las mezclas con aditivo ecológico mostraron densidades compactas comparables o ligeramente menores, pero con porcentajes de vacíos reducidos en comparación con las mezclas con diésel.

Además, las muestras con aditivo ecológico mantuvieron valores consistentes de estabilidad y flujo Marshall, indicando una calidad adecuada para aplicaciones de pavimentación. Estos hallazgos respaldan la viabilidad del aditivo ecológico como una alternativa sostenible y eficaz en la industria del asfalto, promoviendo prácticas que podrían reducir el impacto ambiental sin comprometer las propiedades técnicas necesarias para aplicaciones de ingeniería vial.

En resumen, este estudio no solo confirma la efectividad del aditivo ecológico en reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC) y mejorar la seguridad ambiental, sino que también destaca su impacto positivo en la manejabilidad y durabilidad de las mezclas asfálticas para bacheo en frío.



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

Estas mezclas ofrecen una solución práctica, eficiente y sostenible para el mantenimiento de infraestructuras viales, asegurando reparaciones rápidas, manejables y duraderas, con una vida de anaquel prolongada que optimiza los recursos y reduce los costos operativos.

7. Referencias

- [1]. Código de Regulaciones Federales, 40: Capítulo 1, Subcapítulo C, Parte 51, Subparte F, 51100. Consultado el 8 de febrero de 2009. Glosario de términos ambientales, abreviaturas y acrónimos de la EPA.
- [2]. Conesa-Ferrer, J.A. (2000). Curso básico de análisis térmico. Alicante, España: Club Universitario [Book]. Thermal Analysis in Practice Book • 2018
- [3]. American Standard for Testing and Materials. ASTM E1131-08 Standard Method for Compositional Analysis by Termogravimetry.
- [4]. Libro CM características de los materiales. Materiales para pavimentos. Materiales asfálticos, aditivos y mezclas. Calidad de materiales asfálticos N-CMT-4-05-001/05.
- [5]. ASTM D3960-05 (2018), que establece los procedimientos para la medición de VOC en productos ambientales.
- [6]. ASTM E 1868-10 para la medición de pérdida por secado mediante termogravimetría (TGA).
- [7]. ASTM Standard. (2019). ASTM D8254-19 Standard Test Method for Flash and Fire Points of Asphalt by Cleveland Open Cup Tester. Flash and Fire Points of Asphalt by Cleveland Open Cup Tester. United States: ASTM.
- [8]. ASTM Standars. (2020). ASTM D5/D5M Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. United States: ASTM.
- [9]. AMAAC. (2016). Protocolo AMAAC PA-MA 02/2016. Control y aseguramiento de calidad para mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa de alto desempeño. México: AMAAC.